インクジェットのレーザ観測と階調画像再生

正員 松尾 一 壽 (福岡工大)

非会員 富川 武彦 (神奈川工大)

非会員 片山 年美 (福岡工大)

正員 横川 京次 (福岡工大)

Laser Observation and Tone Reproduction of Ink Jet

Kazuhiisa Matsuo, Member (Fukuoka Institute of Technology), Takehiko Tomikawa, Non-member (Kanagawa Institute of Technology), Toshimi Katayama, Non-member, Kyouji Yokogawa, Member (Fukuoka Institute of Technology)

The ink flight of electrostatically extracted ink jet was observed by He-Ne laser and an Application of this ink flight to tone reproduction is also described in this paper. Dielectric ink was used.

Ink is presumed to be in flight in the form of liquid thread at the nozzle tip and ink corpuscles beyond the region of ink thread. A liquid thread means a continuous flow of ink. In the region beyond the zone of liquid thread, ink corpuscles are generated randomly.

He-Ne laser made possible photographing both an ink thread and the transition of ink jet beyond it in a picture. In analysis of the ink flight, the spread of ink and transition of ink jet were clarified by image processing concretely. Furthermore, we have proved that this transition of ink jet can be applied to tone reproduction.

キーワード：静電誘引形インクジェット、誘電性インク、He-Ne レーザ光、階調画像再生

1. ま え が き

本論文は、静電誘引形インクジェットの誘電性インクを用いた曳糸および曳糸先端以降から分離してインク微粒子となって飛翔する現象（曳糸の状態遷移：仮称）の観測と、その現象に着目した階調画像の再生への応用について述べたものである。従来、インクジェットのインク飛翔は、高速度写真、ストロボスコープなどを利用した、顕微鏡による写真撮影の方法が用いられていた⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、これらは焦点深度が浅く、三次元的に飛翔しているインクジェットの写真撮影するには難点があった。更に、ノズル先端からのインク飛翔は周期性を有している必要がある。

静電誘引形インクジェットの誘電性インクによるインク飛翔は、ノズル先端の近傍から曳糸領域、霧化領域、散乱領域へと遷移しているものと考えられる。

著者らは、このようなインク飛翔を曳糸の状態遷移と呼んでいる。ここで曳糸領域は、連続流のインク液柱を意味する。曳糸の長さは印加電圧またはインク静圧の制御により変化する。霧化領域は、曳糸先端以降において分離したインク微粒子が空間的にある程度均一な範囲内に存在しているものと考えられる。また、散乱領域は、霧化領域の更に先端において、空気抵抗、重力などの影響を強く受けて、乱流状態になっていると思われる。なお、霧化領域および散乱領域におけるインクの飛翔は周期性を有してない。このような曳糸の状態遷移は、インクの飛翔する過程に混在している。

従って、曳糸の状態遷移の写真撮影は、従来の方法では困難である。

He-Ne レーザ光による連続光は、周期性を有してないインク飛翔状況の写真撮影を可能とした⁽³⁾。ま

た、この方法は、ノズル先端から記録紙の位置に至るインク飛翔の全過程を、フィルムの一画面上に平均的な全体像として撮らえることが可能である。He-Ne レーザ光による写真撮影は、印加電圧やインク静圧（インク液面の高さ）などを制御した場合、インク飛翔のインク広がり具合や、曳糸の状態遷移領域などへの解析を有利にするものと考えられる。また、曳糸の状態遷移する現象が、階調画像再生への応用の可能性について検討した。一般にインクジェットを利用した階調画像の再生はインク微粒子の個々を帯電させて、偏向電極により偏向量を制御する方式、インク微粒子径を画像の濃淡に応じて制御する方式などが報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

一方、Hertz らは、同一インク微粒子径を同一位置に重ね打ちして階調を記録することを試みている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

以上の方式は、インク微粒子を精密に制御する必要があり、困難さを伴う。著者らは、静電誘引形インクジェットの誘電性インクを用いた曳糸の状態遷移を応用した階調画像再生方法について検討した⁽⁸⁾。

ノズル先端から一定距離にある記録紙の位置におけるインク微粒子の付着状態を制御することは、曳糸長を制御することに置き換えて考えることができる。

自然画像の有する階調特性を損わずに再生する場合、高濃度の領域に対しては曳糸を利用することができる。また、低濃度の領域に対しては曳糸先端以降において、ほぼ一定の範囲内に記録される霧化（微粒子）領域を利用するものである。階調画像を再生する場合は、大別して前記の二つの領域を利用することにより可能と思われる。静電誘引形インクジェットの誘電性インクによる曳糸の状態遷移を階調画像再生へ応用した例はまだ試みられていない。

階調画像の再生への試みは、比較的制御方法の簡単な印加電圧の制御により行った。

2. He-Ne レーザ光によるインク飛翔観測装置

He-Ne レーザ光による静電誘引形インクジェットのインク飛翔状況を写真撮影するための装置の概要を図1に示す。He-Ne レーザ光は、レンズ L_1 , L_2 , L_3 , L_4 を介してフィルム面または TV カメラに入射する。ここで、He-Ne レーザ光は、レンズ L_2 および L_3 の間において平行光を構成している。この詳細な光学系を図2に示す。

静電誘引形インクジェットの発生装置は、レンズ L_3 の前焦点位置 f_1 あたりに設け、後焦点位置 f_1 には

図1 静電誘引形インクジェットの He-Ne レーザ光によるインク飛翔観測装置
Fig.1. Experimental overall system by He-Ne laser.

図2 インク飛翔観測における光学系の詳細図
Fig.2. Details of observation of flying ink.

レンズ L_3 に集光した平行光を遮るためのビームストップ (B.S.) を設けた。このような光学系を構成することにより、インク微粒子の散乱情報光のみがレンズ L_4 の焦点位置 f_2 であるフィルム面に暗視野散乱像として記録される。

インク微粒子の飛翔軌跡は、He-Ne レーザ光による連続光で撮影することで可能となる。この場合、物体側焦点面上のインク微粒子は高強度の点像として記録されるが焦点面から外れるほど、低強度で広がった像となる。この方法は、ある時間内のインク微粒子の飛跡を撮影することができる。He-Ne レーザ光による観測は、インクジェット飛翔状況を全体像として撮らえるのに最適な方法であると思われる。静電誘引形

〈3・1〉 静電誘引形インクジェットの発生方法

インクは、ノズル-対向電極間に電圧を印加すると飛翔する。インク自身の直流バイアス電圧 V_b をノズルに印加している。画像の濃度情報を電気信号に変換した画像信号電圧 V_i を制御信号として対向電極に印加した。インクは、その差電圧による静電誘引力により誘引され飛翔し、紙面へ付着する。本方式は、ノズル内径に対して 1/100 程度の曳糸径を得ることができると、インク加圧機構や循環系が不要なことなどの特徴を有する。他方式では、ノズル内径の約 2 倍程度の直径をもったインク微粒子を発生している。またノズル径は、細くなるほど、ノズルの目づまりを生じやすくするなどの問題を有している。本方式は、太いノズル径にもかかわらず細い曳糸径を得ることが可能である。

〈3・2〉 階調画像再生の実験装置 実験装置の概要を図3に示す。入力画像データは、TVカメラより256×256画素(pel)として、同一画像データを4回入力した平均値をとっている。この画像データをAD変換器により8 bit/pelの濃度情報としてフロッピーディスクに格納した。今回は、ノズルの形状として、外径680 μm 、内径380 μm 、長さ15 mmのステンレス鋼製パイプを用いた。

従って、ノズルと対向電極間には ($V_b - V_s$) の差電圧が印加される。インクは、この差電圧によるクーロン力に基づいて飛翔する。なお、画像信号電圧 V_s は DA 変換器により出力され対向電極に印加される。記録方法は、ドラムに記録紙を巻付けて行われる。なお、記録は主走査方向にドラムを用いて、パルスモータで制御した。また、副走査方向に対してはノズルヘッド部をリニアパルスモータで制御した。画像データとして、ファクシミリテストチャート No. 1 (画像電子学会) による濃淡の女性像を用いた。

〈4・1〉 曳糸の状態遷移における記録例 ノズル-
 記録紙間の距離を変化させたときの記録例を図4に示
 す。この例では、記録紙を手走査により一定方向に引
 張って記録し、顕微鏡(×100)により写真撮影した
 ものである。ノズル-記録紙間の距離: ℓ は、(a): 3
 mm, (b): 5 mm, (c): 7 mm, (d): 10 mm へと
 徐々に遠ざけた。

記録紙に対するインクの付着状態は、ノズルの先端から記録紙の位置を遠ざげるに従って線状で記録されていたものが、やがて分散して広範囲に記録されるようになる。曳糸の状態遷移する現象はこのように記録

図 3 静電誘引形インクジェットによる階調画像再生装置

Fig. 3. Experimental overall system by electrostatically extracted ink jet.

図 4 静電誘引形インクジェットの記録例
Fig. 4. Example of recordings by ink jet.

紙の位置を変化させることでも理解される。

〈4・2〉 印加電圧を制御した場合の He-Ne レーザ光によるインク飛翔観測 He-Ne レーザ光により写真撮影 (1/30 s) された静電誘引形インクジェットのインク飛翔例を図 5 に示す。インクは、ノズル先端の近傍において細い曳糸となって飛翔するが、対向電極を通過したのち、きれいな銀杏の葉状 (扇形) となり飛散していることが判明された。測定条件は、インク静圧 $H=5$ mm 一定として印加電圧を変化させた。印加電圧は、 $V_1=2.5$ kV で安定なインク飛翔状態を示した。インク飛翔の全体像は、印加電圧を $V_2=2.6$ kV から $V_4=2.8$ kV へと高くするに従って、ノズル先端より右方向 (記録紙の位置) へ伸びていることが理解される。曳糸は、印加電圧の制御により曳糸長が変化する。これは一般に、導電率 $10^{-10} \text{1}/\Omega \cdot \text{m}$ 前後の非

図 5 静電誘引形インクジェットの He-Ne レーザ光によるインク飛翔観測
(インク静圧 $H=5$ mm, 1/30 s)
Fig. 5. Observation of flying ink by He-Ne laser (ink pressure $H=5$ mm, 1/30 s).

図 6 静電誘引形インクジェットの He-Ne レーザによるインク飛翔観測
(インク静圧 $H=10$ mm, $1/30$ s)

Fig. 6. Observation of flying ink by He-Ne laser (ink pressure $H=10$ mm, $1/30$ s).

水系液体において曳糸長は印加電圧により変化し、その極大値が存在することによるものと考えられる⁽⁹⁾。また、印加電圧が $V_2=2.9$ kV になると複数本のインク飛翔が見られるようになる。

これは、対向電極の位置、形状、空間電荷の分布状況、インク液面の表面張力の不均一、インクの物性値、ノズル先端の研磨の状態など様々な要因が考えられる。

階調画像再生は、ノズル-対向電極間の印加電圧を安定なインク飛翔開始電圧から複数本のインク飛翔に至らない印加電圧の範囲でなければならない。

また、He-Ne レーザ光に対してノズルおよび対向電極の位置を 90° 回転させ、インクの飛翔を試みて写真撮影を行った。その、インク飛翔状況に特別な差異は観測されなかった。従って、ノズル先端から飛翔するインクは、対向電極を通過する近辺から霧化状となり、円錐状に飛散していることを示している。

〈4・3〉 インク静圧を制御した場合の He-Ne レーザ光によるインク飛翔観測 インク静圧を制御させたときの静電誘引形インクジェットによるインク飛翔状況の写真撮影 ($1/30$ s) 例を図 6 に示す。同図は、印加電圧 $V=2.5$ kV および 2.9 kV として、インク静圧を $H=10$ mm としたときのインク飛翔例を示す。インク飛翔状況は、図 5 (a) と図 6 (a) の同一の印加電圧で比較すると、インク静圧が高くなるほど記録紙の位置方向へ伸びている。インク飛翔状況の形状自身は、図 5 と基本的に変わらないものと思われる。

このように、曳糸長はインク静圧の制御によっても変化する。これは、ノズル先端のインクメニスカスの曲率半径を変化させ、インク流量の増減が曳糸長に影響を与えるものと考えられる。インク飛翔の条件としては、印加電圧を制御させたときと同じ要因と、更に

ノズル先端に形成されるインクメニスカスの形状効果を考慮する必要があるものと思われる。

5. 静電誘引形インクジェットのインク飛翔状況の画像処理

インク飛翔状況の画像データは 6 bit の濃度情報としてパーソナルコンピュータに取込んだ。取込んだデータは比較の対象とする部分の最大値のデータを 1 として規格化して解析を行った。

〈5・1〉 インク広がり具合について 図 5 (a) の写真をテレビモニタ画面上に写したものを図 7 に示す。

インク飛翔状況におけるインク広がり具合の解析は、解析ライン①に従って行った。解析ライン①は、ノズル先端より飛翔するインクジェットに対して垂直方向に処理する。解析ライン①による処理結果を図 8 (a), (b) に示す。(a) 図は印加電圧 $V_1=2.5$ kV、インク静圧 $H=5$ mm 一定の場合を示す。ノズル先端から飛翔するインク微粒子の密度は、ノズル先端の近傍において高く記録紙方向へ向かうに従って低下している。また、インク飛翔の分布状況は、ノズル近傍において狭く記録紙方向に向かうに従って幅広くなっている。(b) 図は、印加電圧 $V_2=2.9$ kV と高くした場合を示す。この特性は V_1 とほぼ似た現象を示している。しかし、印加電圧が $V_2=2.9$ kV と高くなると、インク微粒子の密度の低下する位置は記録紙の位置へと更に伸びていると同時に、インクの広がり具合は狭くなっている。また、印加電圧 $V=2.5$ kV として、インク静圧 $H=10$ mm とした特性を図 9 に示す。インク飛翔状況は、図 8 (a) と比較して、インク静圧を高くすると記録紙の方向へと更に伸びると同時に、イ

図 7 静電誘引形インクジェットのインク飛翔 (TV モニタ画像)

Fig. 7. Flying ink jet on TV monitor.

図 8 印加電圧を制御させた場合のインク飛翔分布の三次元表示

Fig. 8. Three dimensions of flying ink by controlling applied voltage.

インク広がり具合は狭くなることが明らかとなった。

記録紙位置における、インク広がり具合を図 10(a), (b)に示す。ここでの、インク広がり具合は、(a)図に示すように最大値 ($D_{\max}$) の半分 ($D_{\max}/2$) のときの広がり幅 (W) とした。(a)図は、印加電圧 $V=2.5$ kV 一定として、インク静圧を $H_1=5$ mm および $H_2=10$ mm と制御させた場合を示す。この場合のインク広がり具合の変化率は約 58.2%であった。また(b)図は、インク静圧 $H=5$ mm 一定として印加電圧を $V_1=2.5$ kV および $V_2=2.9$ kV と制御させた場合である。インク広がり具合の変化率は約 48.5%であった。インク飛翔の広がり具合は、記録紙位置の方向においてインク静圧を制御

図 9 インク静圧を制御させた場合のインク飛翔分布の三次元表示

Fig. 9. Three dimensions of flying ink by controlling ink pressure.

(a) 印加電圧 $V=2.5$ kV

(b) インク静圧 $H=5$ mm

図 10 記録紙位置におけるインク広がり具合
Fig. 10. Ink spread condition on the recording position.

させたほうが大きいことが明らかとなった。

〈5・2〉 曳糸の状態遷移領域の伸びについて

図 7 の解析ライン②について処理した結果を、図 11(a), (b)に示す。解析ライン②は、ノズル先端から飛翔するインクジェットの記録紙方向に対する伸び具合、つまり、曳糸の状態遷移領域特性について解析した。(a)図は、印加電圧 ($V=2.5$ kV) を一定としてインク静圧を $H=5$ mm および $H=10$ mm と制御させた場合を示す。

インク静圧の制御による曳糸の状態遷移の変化率は、約 26%であった。(b)図は、インク静圧 ($H=5$ mm) を一定として印加電圧を $V_1=2.5$ kV および $V_2=2.9$ kV とした場合を示す。この場合、曳糸状態遷移領域の変化率は約 20%であった。曳糸の状態遷移

 (a) 印加電圧 $V = 2.5 \text{ kV}$

 (b) インク静圧 $H = 5 \text{ mm}$

図 11 曳糸の状態遷移領域特性

Fig. 11. Characteristics of transition state of liquid thread region.

する領域は、印加電圧が高いほど先端に伸びている。曳糸の状態遷移領域の変化は、インク静圧を制御させたほうがインクの広がり具合と同様に大きいことが明らかとなった。

階調画像再生は、記録紙の位置において印加電圧またはインク静圧の差によりインク微粒子の密度の差となり、これが記録濃度の差として表現されるものと考えられる。

6. 階調画像の再生例

静電誘引形インクジェットの誘電性インクに用いた曳糸の状態遷移を利用した階調画像の再生例を図 12 に示す。このように、曳糸長の位置に対するインク微粒子化状態の変化を記録濃度の変化とした応用が可能である。再生例を顕微鏡により判断した結果、曳糸領域は女性像の背景の高濃度部分、毛髪的一部分、洋服などの再生に、また霧化領域は女性画像背景の低濃度部分、額、えり元などの再生に反映されている。

7. むすび

静電誘引形インクジェットの誘電性インクによるインク飛翔状況に He-Ne レーザ光を照射して観測した。

図 12 階調画像再生例

Fig. 12. Example of print.

本方式は、静電誘引形インクジェット方式による曳糸の状態遷移する状況を、ノズル先端から記録紙に至るまで平均的な全体像としての観測を可能とした。これらの結果、インクの記録位置における広がり具合、また曳糸の状態遷移領域など詳細な振舞いが明らかになった。記録紙の位置におけるインクの広がり具合は、印加電圧およびインク静圧を高く制御するに従って狭くなった。曳糸の状態遷移領域は、印加電圧およびインク静圧を高く制御するに従って、その遷移状態は更にノズル先端方向へと伸びを示した。

インク静圧の制御は、ノズル先端に形成されるインクメニスカスの形状効果に大きく影響を与えるものと思われる。本方式による階調画像再生は、曳糸領域および霧化領域を利用して、今回試みた電極位置などに対して低いインク静圧が適当であった。

曳糸の状態遷移は、印加電圧の制御に対してインク静圧を制御したほうが、その変化率は大きい。しかし、階調画像の再生には微妙な濃度差が必要であり、印加電圧を制御したほうが制御方法も簡単であり、有利であると思われる。曳糸の状態遷移を利用した階調画像の再生は、特に霧化時の再生画像が目に見えて不快感を与えておらず、アパーチャによるインク微粒子の制御が不要である。

また、霧化時を利用した画像の再生は、低濃度領域の再生に有利である。一般に対向電極の構造は、円板状または円筒形で構成され、それに微小な口径のノズルからインクを噴出するものが多く見受けられる。これらの構造は、インクによる目づまりの原因になりやすいものと思われる。本研究では、棒状電極を対向させて対向電極として試みたため、ノズル先端の部分においてインクが目づまりなどはなかった。

今後は、インク微粒子径、曳糸径およびインク飛翔速度などインク飛翔の瞬間的な振舞いの詳細な検討が必要であると考えられる。

日ごろ御指導をいただく九州大学工学部 平川一美教授、またレーザ光計測の方法について助言いただいた

た同大工学部 村上昭年教授に深く感謝いたします。
(平成3年11月25日受付)

文 献

- (1) 安院居・清弘・中内:「インクジェットに関する基礎研究」, 画像電学誌, **3**, 69 (昭49)
- (2) 富田・石橋・横山:「静電形インクジェットプリンタに関する基礎研究」, 機械学論, **B52**, 1215 (昭61)
- (3) 松尾・黒田・片山・富川・横川・中島:「静電誘引形インクジェットのHe-Neレーザ観測」, 平2電気学会大, No. 816
- (4) C. H. Hertz & A. Mansson: "Electric Control of Fluids Jets and its Application to Recording Devices", *Rev. Sci. Instrum.*, **43**, No. 3, 413 (1972)
- (5) E. Stemme & S. Larsson: "The Piezoelectric Capillary Injector", *IEEE Trans. Electr. Devices*, **ED-20**, No. 1, 14 (1973)
- (6) C. H. Hertz & B. Samuelsson: "Ink Jet Printing of Photographic Quality Color Images", *SPSE's 4th*, p. 150 (1988)
- (7) C. H. Hertz & B. Samuelsson: "Ink Jet Printing of Photographic Quality Images", *J. Imaging Tech*, **15**, 141 (1989)
- (8) 松尾・富川・片山・中島:「インクジェットの状態遷移を利用した階調画像再生」, 電学論 **C**, **109**, 400 (平元-5)
- (9) 萩原:「静電気による液体の微粒化(II)」, 第21回秋期応用物理学会予稿集, p. 151 (昭49)

松 尾 一 壽 (正員)

昭和23年9月27日生。46年3月福岡工業大学工学部電子工学科卒業。61年4月同大学講師。インクジェットの応用に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 会員。

富 川 武 彦 (非会員)

昭和20年2月1日生。57年3月静岡大学大学院博士課程修了。60年4月神奈川工科大学助教授, 現在に至る。画像処理の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, IEEE 会員。

片 山 年 美 (非会員)

昭和19年7月2日生。40年3月福岡工業短期大学電子工学科卒業。40年4月福岡工業大学助手, 現在に至る。画像処理に関する研究に従事。情報処理学会, 日本経営工学会会員。

横 川 京 次 (正員)

昭和28年京都大学工学部電気工学科卒業。同年神鋼電機(株)入社。回転機設計担当部長, 生産管理部長などを歴任し, 56年技術開発本部副部長。60年福岡工業大学工学部管理工学科教授, 現在に至る。工学博士。直流電動機とその制御の研究に従事し, 現在は, 主として経営情報システムの研究に従事。電子情報通信学会, 日本経営工学会会員。